



# Fysische grondslagen radioprotectie

## deel 1

**dhr. Rik Leyssen**  
**Fysicus Radiotherapie**  
**Limburgs Oncologisch Centrum**  
**[rik.leyssen@jessazh.be](mailto:rik.leyssen@jessazh.be)**



# Fysische grondslagen radioprotectie

**Wat is straling?**

**Gevaarlijk?**

**Radioactiviteit?**

**Bescherming?**

**Hoe mee omgaan in praktijk?**

**=> Wetenschappelijke achtergrond**



## **Wat is straling?**

- **Dagelijks in aanraking (radio,gsm,...)**
- **Niet direct waarneembaar met menselijke zintuigen (horen, zien,...)**
- **Bepaald soort straling is schadelijk =>**

**Schrik,angst!?**

- **Vergelijk met autorijden**

**=> Wetenschappelijke achtergrond**



# Fysische grondslagen radioprotectie

**H1: INLEIDING**

**H2: STRALING - RADIOACTIVITEIT**

**H3: WISSELWERKING TUSSEN  
STRALING EN MATERIE**

**H4: STRALINGSEENHEDEN EN GROOTHEDEN**



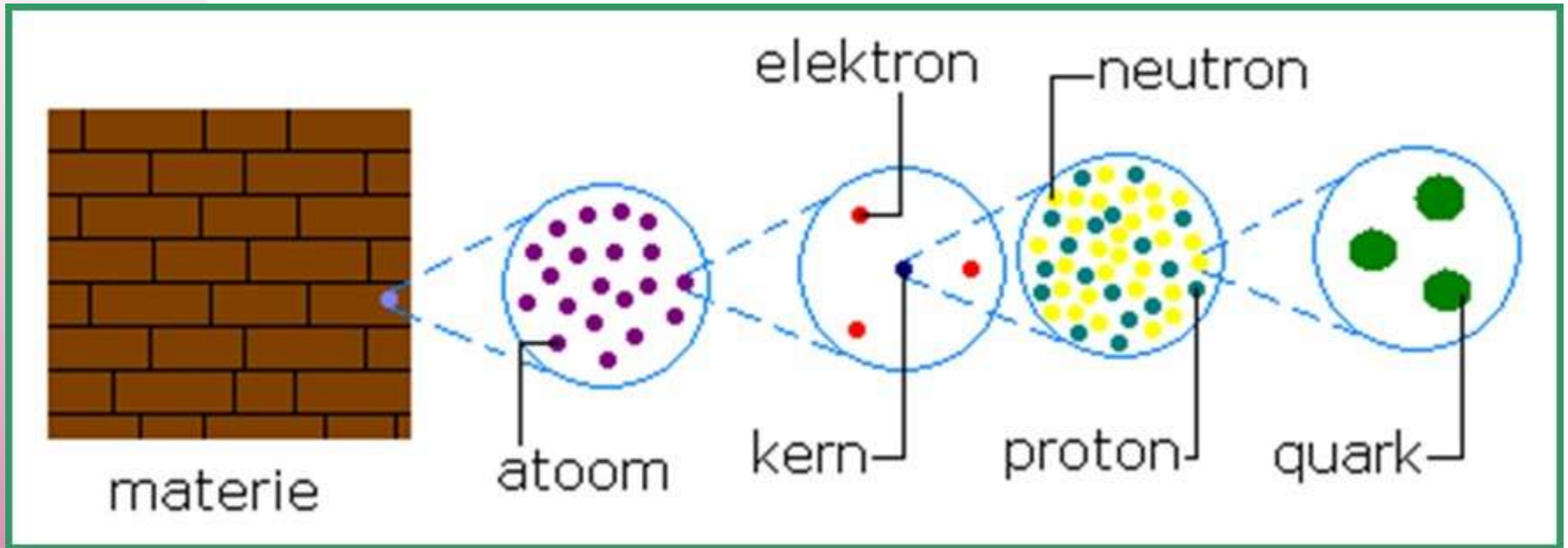
# H1: INLEIDING

## Straling:

- Niet direct waarneembaar
- Oorsprong op “atomair” niveau
- 1 miljardste meter = 1 nanometer  
(zelfde verhouding aarde - tennisbal)
- Alle materie bestaat uit atomen
- Atomen zijn opgebouwd uit elementaire deeltjes



# H1: INLEIDING





# H1: INLEIDING

**WATER**



**MOLECULEN (H<sub>2</sub>O)**



**ATOMEN (H, O)**



**elementaire deeltjes (e, p, n)**



...



# H1: INLEIDING

**ATOOM**



**ELEKTRONEN (e)**

**atoomkern**



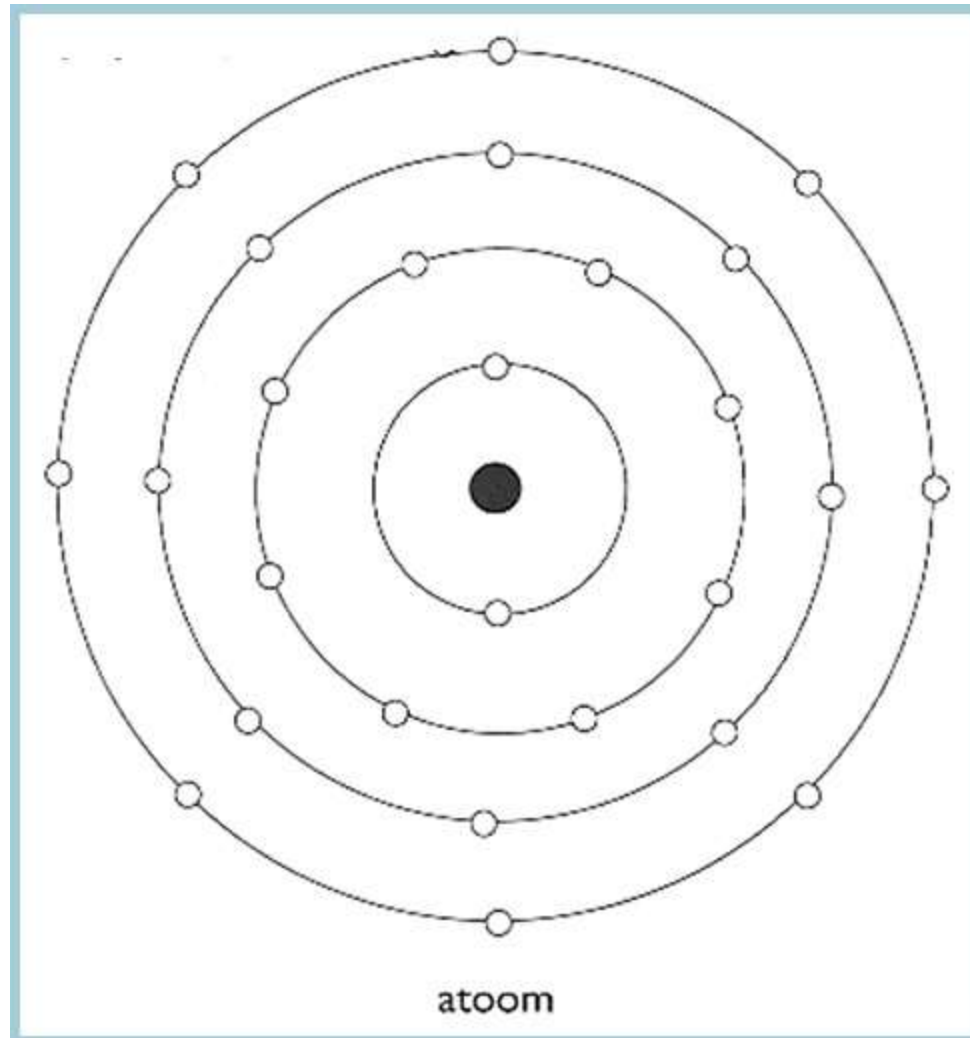
**PROTONEN (p)**

**NEUTRONEN (n)**





# voorstelling atoomstructuur





# voorstelling atoomstructuur

---





# H1: INLEIDING

**Atomen zijn bouwstenen voor materie rond ons heen**





# overzicht elementaire deeltjes

deeltje	rustmassa <sup>a</sup>	lading <sup>b</sup>
Proton (p)	1.0072765	+1
Elektron (e <sup>-</sup> , β <sup>-</sup> )	0.0005486	-1
Neutron (n)	1.0086650	0
Positron (e <sup>+</sup> )	0.0005486	+1
Foton	0	0

**X 2000**



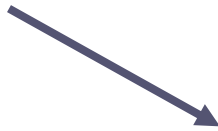
<sup>a</sup> amu =  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg    <sup>b</sup> e =  $1.60 \cdot 10^{-19}$  C

**!! > 99.9% van de massa zit in de kern !!**



# H1: INLEIDING

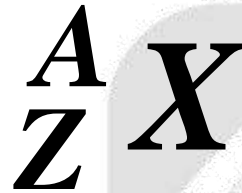
**Protonen, neutronen en elektronen zijn bouwstenen voor atomen**





# samenstelling van het atoom

± 106 ≠ atoomsoorten (H, O, Tc, Po, ...)



**atoomnummer (Z)** = # protonen in de kern  
(= plaats in tabel van Mendeljev)

**massagetal (A)** = totaal # deeltjes in kern  
= # protonen + # neutronen



# H1: INLEIDING

$\pm 106 \neq$  atoomsoorten (H, O, Tc, Po, ...)

THE PERIODIC TABLE

1 IA												13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA
1 <b>H</b> 1.008 Hydrogen												5 <b>B</b> 10.81 Boron	6 <b>C</b> 12.01 Carbon	7 <b>N</b> 14.01 Nitrogen	8 <b>O</b> 16.00 Oxygen	9 <b>F</b> 19.00 Fluorine	10 <b>Ne</b> 20.18 Neon
2 <b>Li</b> 6.94 Lithium	2 <b>Be</b> 9.01 Beryllium																
3 <b>Na</b> 22.99 Sodium	4 <b>Mg</b> 24.31 Magnesium																
		3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB						
4 <b>K</b> 39.10 Potassium	20 <b>Ca</b> 40.08 Calcium	21 <b>Sc</b> 44.96 Scandium	22 <b>Ti</b> 47.88 Titanium	23 <b>V</b> 50.94 Vanadium	24 <b>Cr</b> 52.00 Chromium	25 <b>Mn</b> 54.94 Manganese	26 <b>Fe</b> 55.85 Iron	27 <b>Co</b> 58.93 Cobalt	28 <b>Ni</b> 58.69 Nickel	29 <b>Cu</b> 63.55 Copper	30 <b>Zn</b> 65.39 Zinc	31 <b>Ga</b> 69.72 Gallium	32 <b>Ge</b> 72.61 Germanium	33 <b>As</b> 74.92 Arsenic	34 <b>Se</b> 78.96 Selenium	35 <b>Br</b> 79.90 Bromine	36 <b>Kr</b> 83.80 Krypton
5 <b>Rb</b> 85.47 Rubidium	38 <b>Sr</b> 87.62 Strontium	39 <b>Y</b> 88.91 Yttrium	40 <b>Zr</b> 91.22 Zirconium	41 <b>Nb</b> 92.91 Niobium	42 <b>Mo</b> 95.94 Molybdenum	43 <b>Tc</b> (97.9) Technetium	44 <b>Ru</b> 101.07 Ruthenium	45 <b>Rh</b> 102.91 Rhodium	46 <b>Pd</b> 106.42 Palladium	47 <b>Ag</b> 107.87 Silver	48 <b>Cd</b> 112.41 Cadmium	49 <b>In</b> 114.82 Indium	50 <b>Sn</b> 118.71 Tin	51 <b>Sb</b> 121.76 Antimony	52 <b>Te</b> 127.60 Tellurium	53 <b>I</b> 126.90 Iodine	54 <b>Xe</b> 131.29 Xenon
6 <b>Cs</b> 132.91 Cesium	56 <b>Ba</b> 137.33 Barium	57 <b>La</b> 138.91 Lanthanum	72 <b>Hf</b> 178.49 Hafnium	73 <b>Ta</b> 180.95 Tantalum	74 <b>W</b> 183.85 Tungsten	75 <b>Re</b> 186.21 Rhenium	76 <b>Os</b> 190.2 Osmium	77 <b>Ir</b> 192.22 Iridium	78 <b>Pt</b> 195.08 Platinum	79 <b>Au</b> 196.97 Gold	80 <b>Hg</b> 200.59 Mercury	81 <b>Tl</b> 204.38 Thallium	82 <b>Pb</b> 207.2 Lead	83 <b>Bi</b> 208.98 Bismuth	84 <b>Po</b> (209) Polonium	85 <b>At</b> (210) Astatine	86 <b>Rn</b> (222) Radon
7 <b>Fr</b> 87 223.02 Francium	88 <b>Ra</b> 226.03 Radium	89 <b>Ac</b> 227.03 Actinium	104 <b>Rf</b> (261) Rutherfordium	105 <b>Db</b> (262) Dubnium	106 <b>Sg</b> (263) Seaborgium	107 <b>Bh</b> (262) Bohrium	108 <b>Hs</b> (265) Hassium	109 <b>Mt</b> (266) Meitnerium	Unamed Discovery 110 Nov. 1994	Unamed Discovery 111 Nov. 1994	Unamed Discovery 112 1996		Unamed Discovery 114 1999		Unamed Discovery 116 1999		Unamed Discovery 118 1999

ALKALI METALS      ALKALI EARTH METALS      HALOGENS      NOBLE GASES

LANTHANIDES

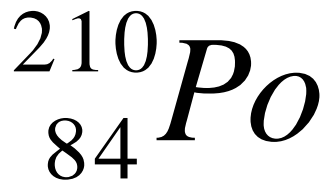
<b>Ce</b> 58 140.12 Cerium	<b>Pr</b> 59 140.91 Praseodymium	<b>Nd</b> 60 144.24 Neodymium	<b>Pm</b> 61 (145) Promethium	<b>Sm</b> 62 150.36 Samarium	<b>Eu</b> 63 152.97 Europium	<b>Gd</b> 64 157.25 Gadolinium	<b>Tb</b> 65 158.93 Terbium	<b>Dy</b> 66 162.50 Dysprosium	<b>Ho</b> 67 164.93 Holmium	<b>Er</b> 68 167.26 Erbium	<b>Tm</b> 69 168.93 Thulium	<b>Yb</b> 70 173.04 Ytterbium	<b>Lu</b> 71 174.97 Lutetium
<b>Th</b> 90 232.04 Thorium	<b>Pa</b> 91 231.04 Protactinium	<b>U</b> 92 238.03 Uranium	<b>Np</b> 93 237.05 Neptunium	<b>Pu</b> 94 244.06 Plutonium	<b>Am</b> 95 243.06 Americium	<b>Cm</b> 96 247.07 Curium	<b>Bk</b> 97 247.07 Berkelium	<b>Cf</b> 98 251.08 Californium	<b>Es</b> 99 252.08 Einsteinium	<b>Fm</b> 100 257.10 Fermium	<b>Md</b> 101 258.10 Mendelevium	<b>No</b> 102 259.10 Nobelium	<b>Lr</b> 103 260.10 Lawrencium



# samenstelling van het atoom

± 106 ≠ atoomsoorten (H, O, Tc, Po, ...)

*massagetal*  
*atoomnummer* **Symbol**







# samenstelling van het atoom

$\pm 106 \neq$  atoomsoorten (H, O, Tc, Po, ...)

**Atoom is neutraal geladen**  
**# protonen = # elektronen**



# ISOTOPEN

*gelijk* # protonen  $\Rightarrow$  zelfde atoomsoort

*verschillend* # neutronen in de kern

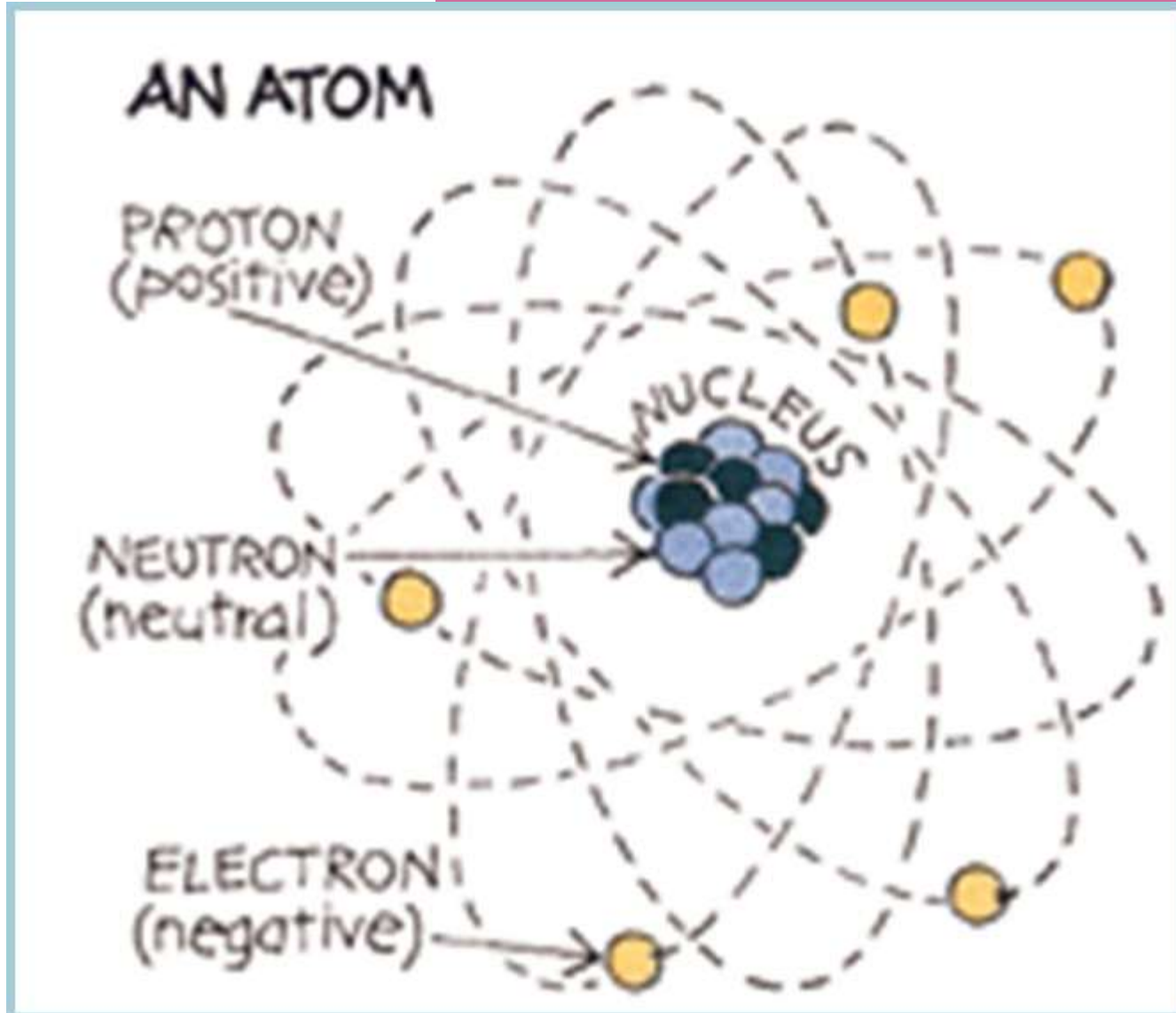
vb:  $^{208}\text{Po}$  84 protonen en 124 neutronen

$^{209}\text{Po}$  84 protonen en 125 neutronen

$^{210}\text{Po}$  84 protonen en 126 neutronen



# overzicht atoommodel





# Fysische grondslagen radioprotectie

H1: INLEIDING

H2: STRALING - RADIOACTIVITEIT

H3: WISSELWERKING TUSSEN  
STRALING EN MATERIE

H4: STRALINGSEENHEDEN EN GROOTHEDEN



## H2A: STRALING

---

- Wat is straling?

Vorm van energie-overdracht  
zonder dat er direct contact is.



# H2A: STRALING

- Wat is straling?

Vorm van energie-overdracht zonder dat er direct contact is.

- Energie:  
beweging, warmte, kracht zetten,  
breken,...
- Energie & contact: bal trappen





# H2A: STRALING

- Wat is straling?

Vorm van energie-overdracht zonder dat er direct contact is.

- Zonlicht
- Infraroodverwarming
- Microgolfoven
- Röntgenstraling
- ...





# H2A: STRALING

- Opdeling van straling:
  - Elektromagnetische straling en deeltjesstraling
  - Ioniserende straling en niet-ioniserende straling.





# H2A: STRALING

<b>Straling</b>	<b>Elektromagnetisch</b>	<b>Deeltjes</b>
niet-ioniserend	radiogolven warmtestraling licht	komt nauwelijks voor
ioniserend	röntgenstraling $\gamma$ -straling	$\alpha$ -straling $\beta$ -straling protonen neutronen



# H2A: STRALING

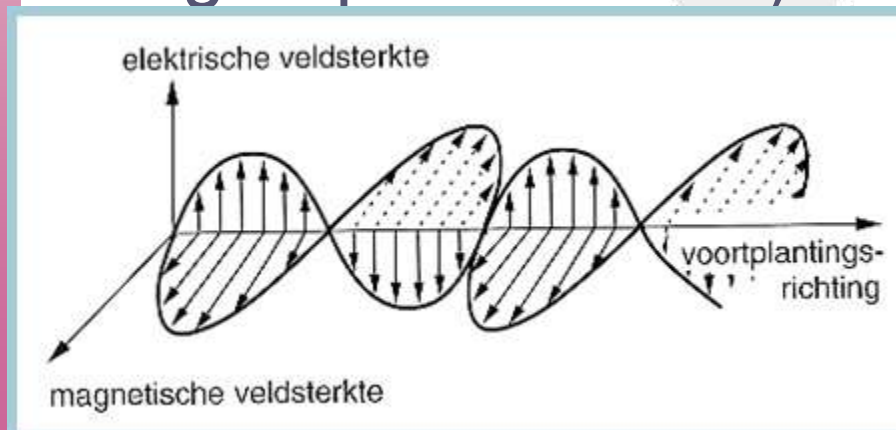
<b>Straling</b>	<b>Elektromagnetisch</b>	<b>Deeltjes</b>
niet-ioniserend	radiogolven warmtestraling licht	komt nauwelijks voor
ioniserend	röntgenstraling $\gamma$ -straling	$\alpha$ -straling $\beta$ -straling protonen neutronen



# EM-STRALING

(Wetenschappelijk)

- vorm van **energietransport** wanneer een elektrische lading wordt versneld
- in de ruimte uitbreidende combinatie van een golfvormig **elektrisch** en **magnetisch** veld
- sinusvormige golven met een bepaalde **frequentie** (# trillingen per seconde) en **golflengte**





# EM-STRALING

Deze vorm van energietransport stellen we voor de een **FOTON**.

Foton is “fictief” deeltje dat de energie overbrengt.

Bvb. Zon zendt warmtepakket uit (= foton)



*Massa van foton is 0!*



# EM-STRALING

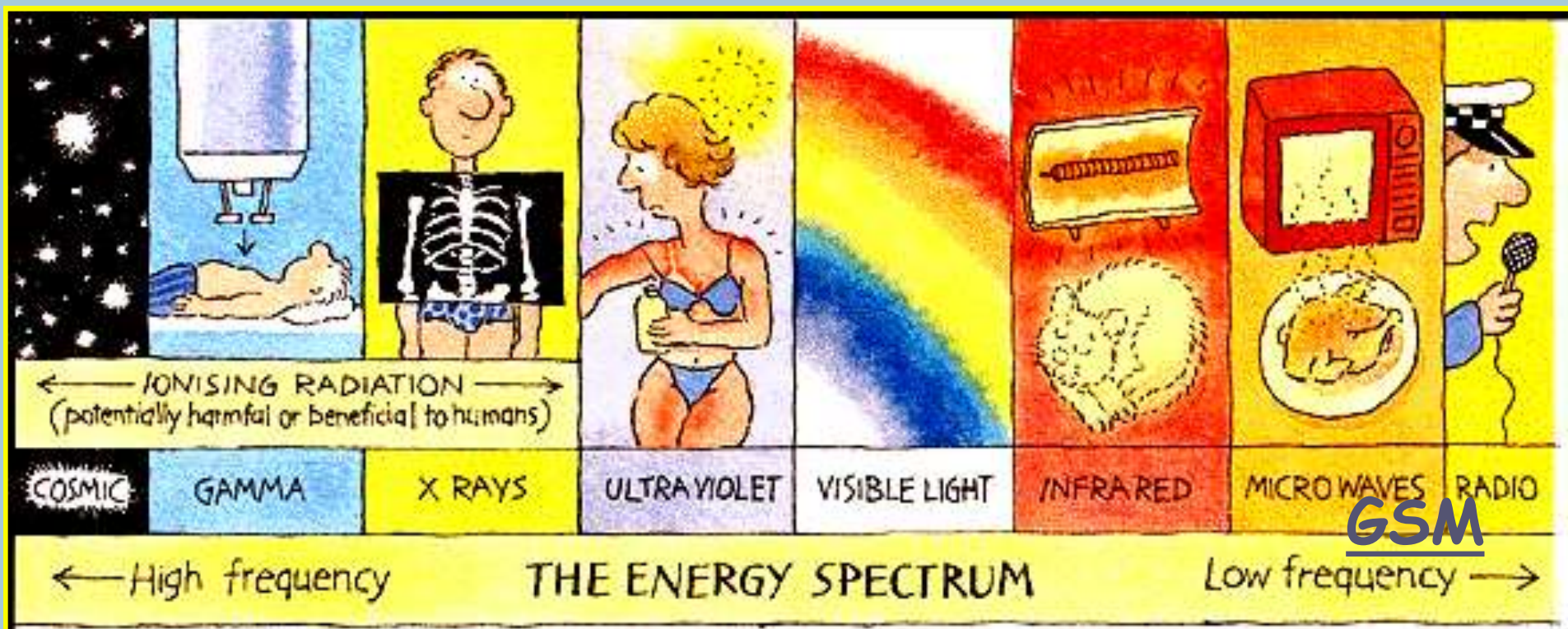
(Wetenschappelijk)

**FOTON** = aantal discrete verstoringen in de ruimte met een bepaalde energie  $E$   
= discreet pakketje (quantum) van EM energie

$$E_{\text{foton}} = hf \text{ (energie } \propto \text{ met frequentie)}$$



# ELEKTROMAGNETISCH SPECTRUM



Hoge Energie

Lage Energie

← Korte golflengte

→ Lange golflengte



# DEELTJESSTRALING

## Straling

niet-ioniserend

## Elektromagnetisch

radiogolven

warmtestraling

licht

ioniserend

röntgenstraling

$\gamma$ -straling

## Deeltjes

komt nauwelijks voor

$\alpha$ -straling

$\beta$ -straling

elektronen

protonen

neutronen



# DEELTJESSTRALING

- Wat is straling?

Vorm van energie-overdracht zonder dat er direct contact is.

- Volgens “definitie” geen echte straling want energie overdracht gebeurt via deeltjes
- Waarom wel? - Historisch
  - Vertoont eigenschappen van straling (Kwantummechanica)





# DEELTJESSTRALING

Elementaire deeltjes: protonen, neutronen en  
neutronen:

- $\alpha$ -straling, twee protonen en twee neutronen



- $\beta$ -straling, elektronen *of* positronen
- Neutronenstraling
- Protonenstraling

(Benaming is historisch)



# IONISERENDE STRALING

## Straling

niet-ioniserend

## Elektromagnetisch

radiogolven

warmtestraling

licht

## Deeltjes

komt nauwelijks voor

ioniserend

röntgenstraling

$\gamma$ -straling

$\alpha$ -straling

$\beta$ -straling

elektronen

protonen

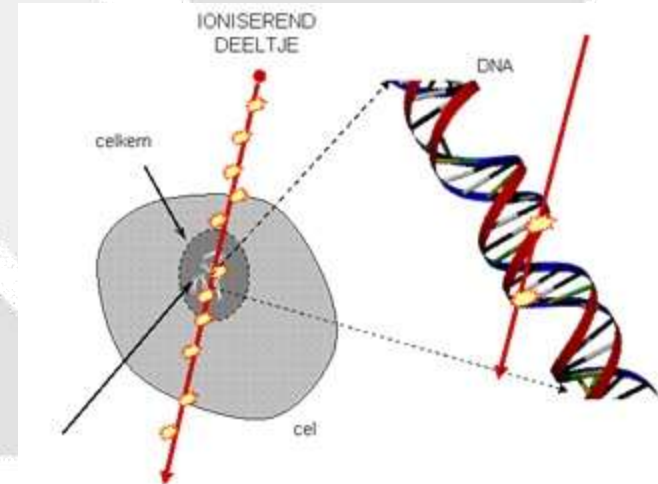
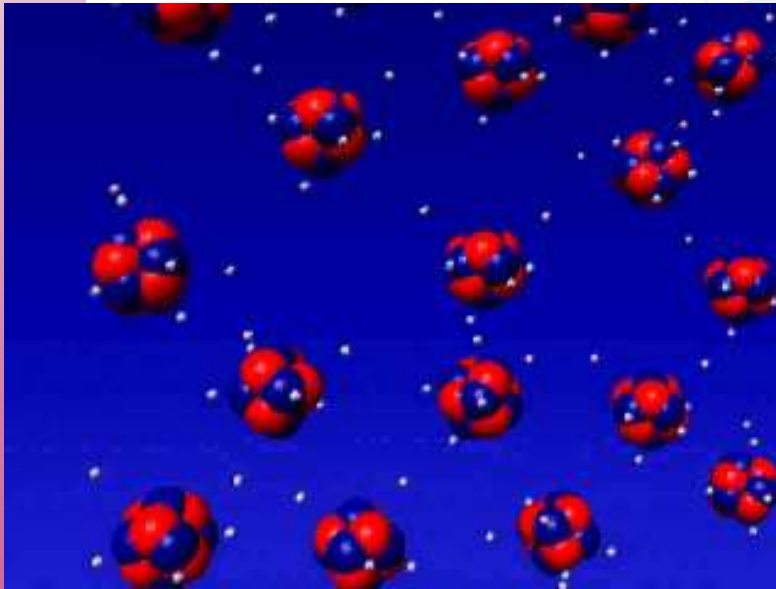
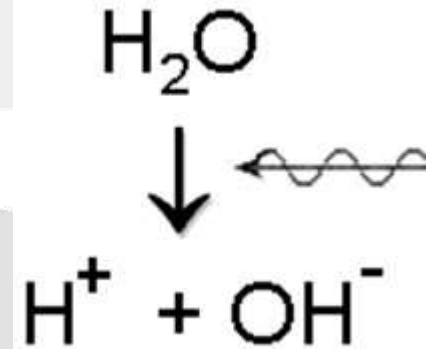
neutronen



# IONISERENDE STRALING

= straling die in staat is *ionen* te vormen in materie waarop ze valt

**ION** = atoom met te weinig of teveel  $e^-$   
= elektrisch geladen atoom





# IONISERENDE E-M STRALING

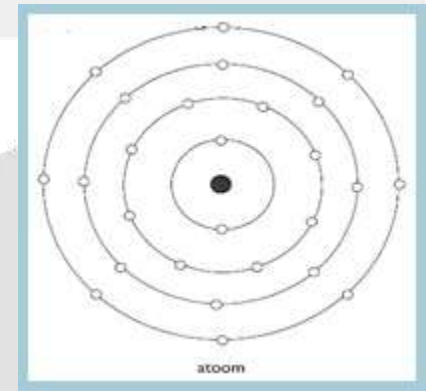
<b>Straling</b>	<b>Elektromagnetisch</b>	<b>Deeltjes</b>
niet-ioniserend	radiogolven warmtestraling licht	komt nauwelijks voor
ioniserend	röntgenstraling γ-straling	α-straling β-straling elektronen protonen neutronen



# ioniserende (EM) straling

## • $\gamma$ -straling

- Oorsprong = verval van aangeslagen atoomkernen
- pure energie (1 energie)

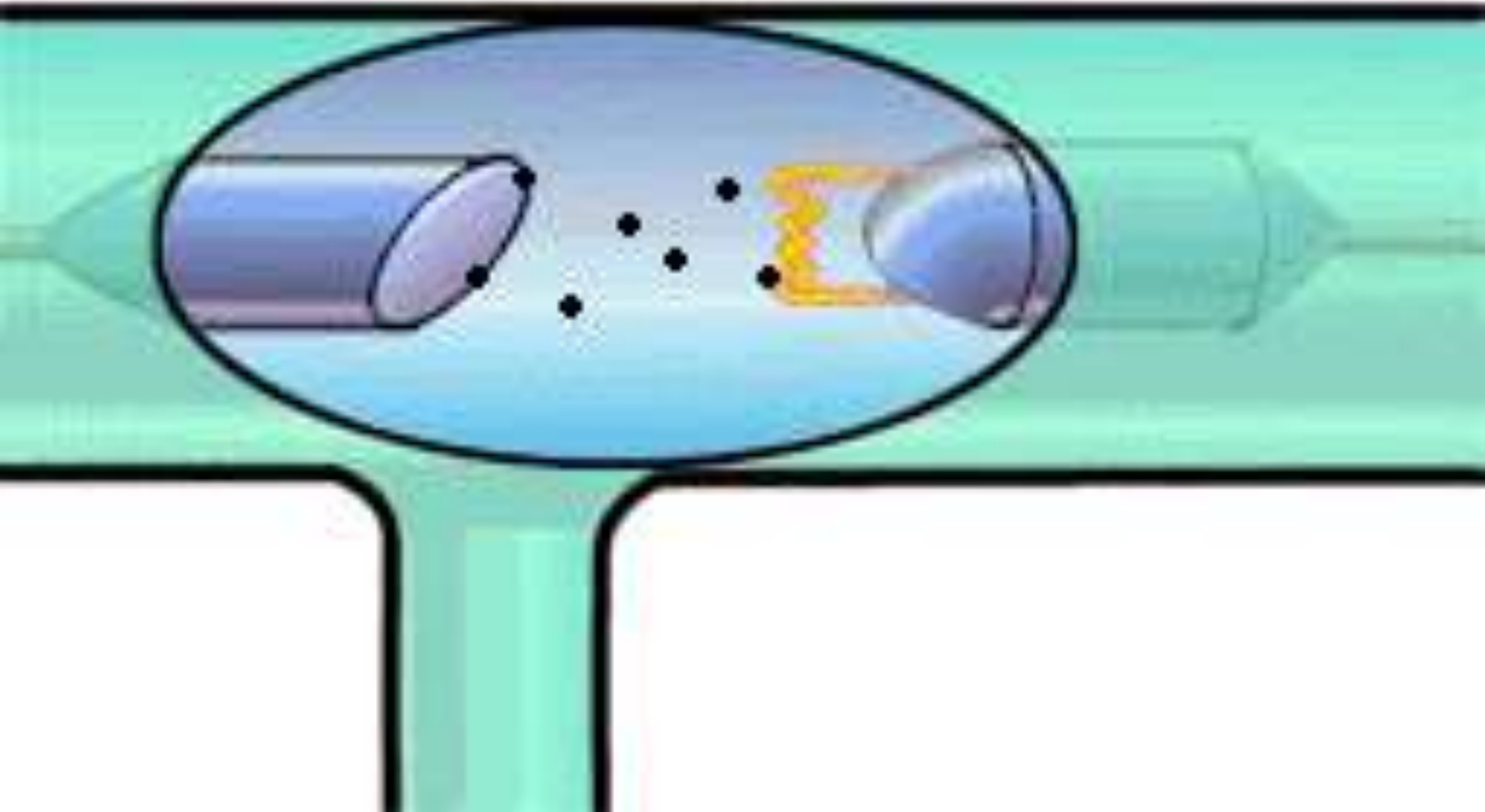


## • röntgenstraling

- Oorsprong = interactie tussen elektronen en atomen
- Energie spectrum (meerdere energieën)



# ioniserende (EM) straling





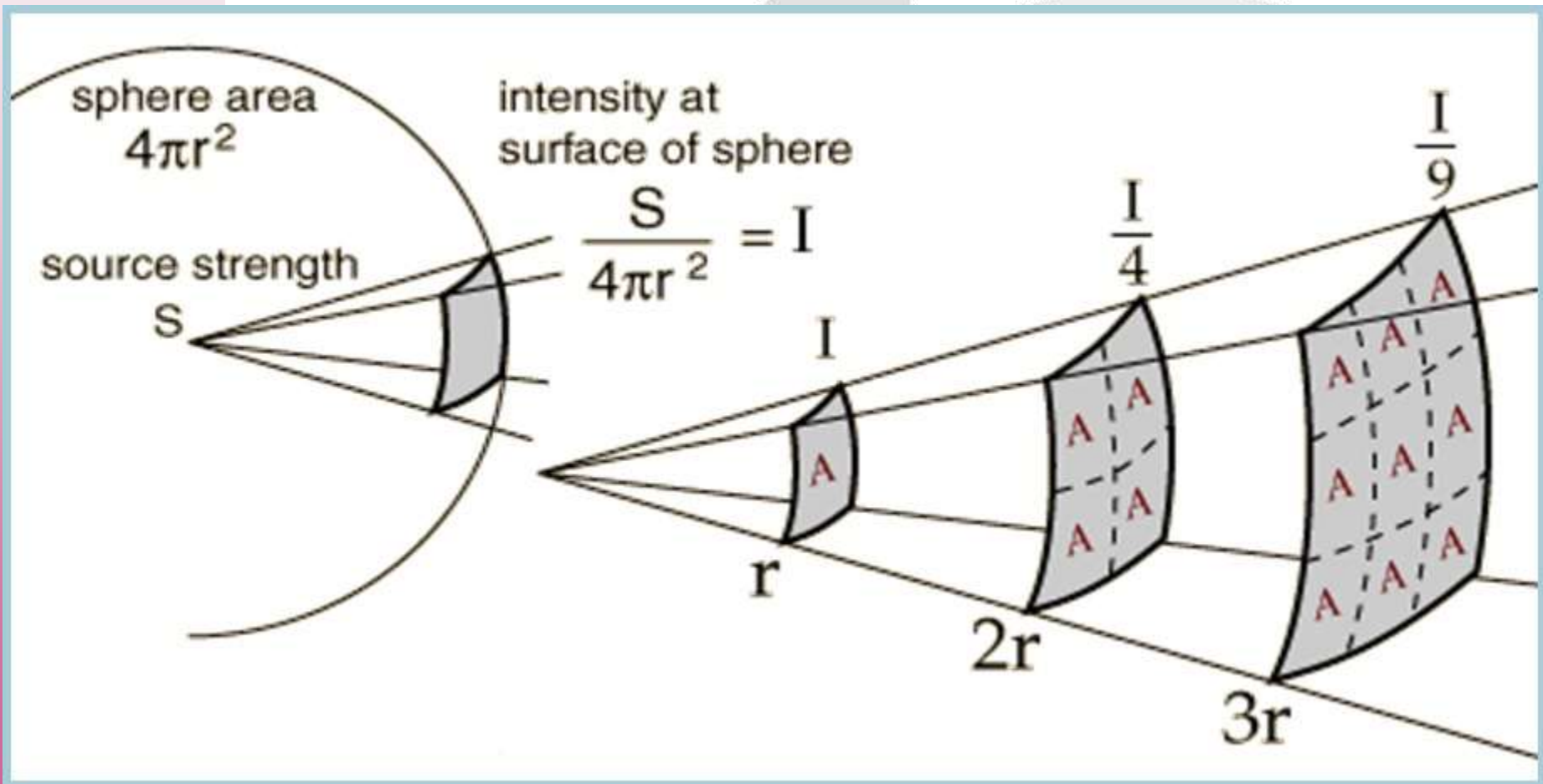
# **Belangrijke eigenschap van straling = Kwadratenwet.**

**Hoe verder van de stralingsbron hoe minder straling => Logisch  
Verband tussen intensiteit en afstand is KWADRATISCH**



# Belangrijke eigenschap: KWADRATENWET

= intensiteit is omgekeerd evenredig met het **kwadraat van de afstand**

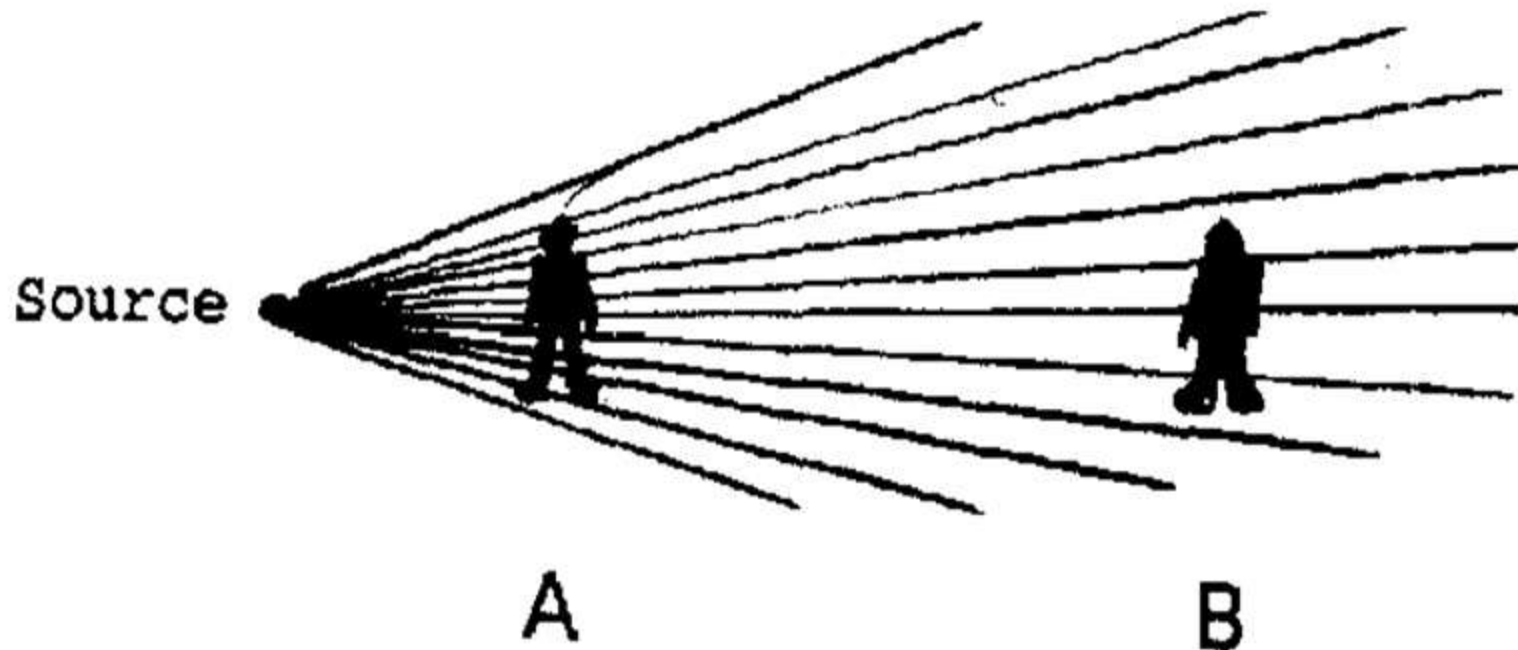






# KWADRATENWET

= intensiteit ( $\Delta E / \Delta t$ ) is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand



bv. als je 3x zover van de bron staat dan lijkt hij 9x zo zwak.



# KWADRATENWET

= intensiteit ( $\Delta E / \Delta t$ ) is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand

**AFSTAND HALVEREN  $\Rightarrow$  DOSIS  $\times 4$  !!!**

belangrijkste stralingsbescherming principes

♠ TIJD

♠ AFSCHERMING

♠ AFSTAND



# Stralingsbescherming

Tijd, afscherming, afstand

**Actie: radioactieve bron van punt A naar punt B verzetten. Actie duurt 10 seconden en bron straalt met 10 dosiseenheden per seconde.**

**Opgelopen dosis =  $10 \cdot 10 = 100$  dosiseenheden**

**Wat als we afstand verdubbelen met bvb. lange pincet maar actie duur dubbel zo lang (20s)?**

**Opgelopen dosis =  $10 \cdot 20 = 200$  dosiseenheden (langere tijd)  
maar grotere afstand dus  $2^2 = 4$  keer minder  
=  $200/4 = 50$  dosiseenheden**



# Fysische grondslagen radioprotectie

H1: INLEIDING

H2: STRALING - **RADIOACTIVITEIT**

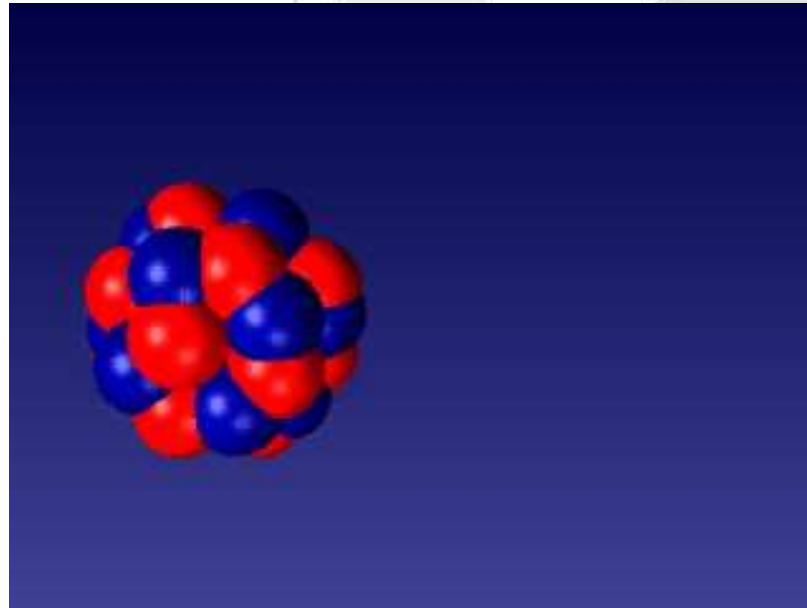
H3: WISSELWERKING TUSSEN  
STRALING EN MATERIE

H4: STRALINGSEENHEDEN EN GROOTHEDEN



# H2B: RADIOACTIVITEIT

= natuurlijk verschijnsel waarbij **onstabiele atoomkernen** een beter evenwicht bereiken door **ioniserende straling uit te zenden**





Marie Curie



Pierre Curie



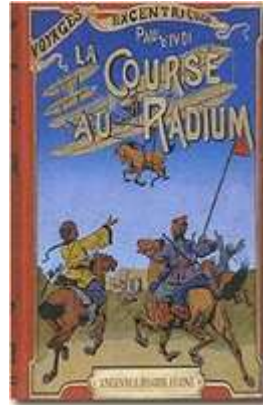
In het laboratorium:  
extraheren van Radium



# “Le Radium est bon pour tout ...”



Publiciteit voor radioactieve stoffen



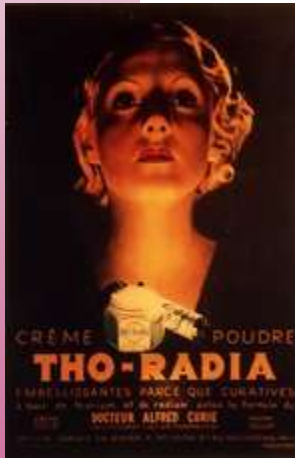
Science-fiction verhaal



Dieët-producten



Schoonheidsprodukten: ‘Stimulerende crèmes’



Schoonheidsprodukten: Make-up



Schoonheidsprodukten: ‘Stimulerende baden’



“Neem twee tabletten met een glas water vóór en na elke maaltijd. Om het meest effectieve effect te bereiken, dient ARIUM gebruikt te worden zoals aangegeven.”



“Zwakke Ontmoedigde Mannen!  
Bruis over van levensvreugde door het gebruik van Radium”



# NIET BEWUST VAN HET GEVAAR

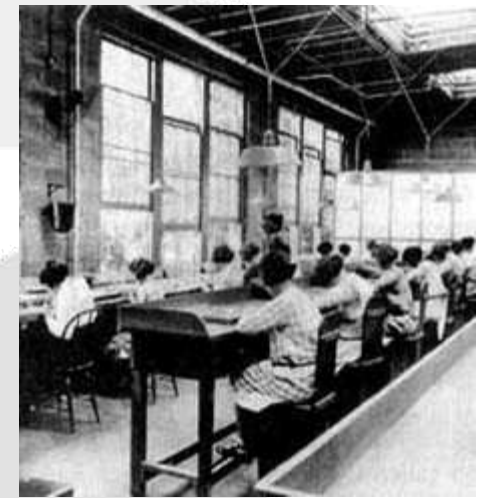
1920-1930



Schoenpasser  
fluoroscoop



Extraheren van radium  
met pipetten



De “radium-meisjes”  
verven van horloges





1901-1920

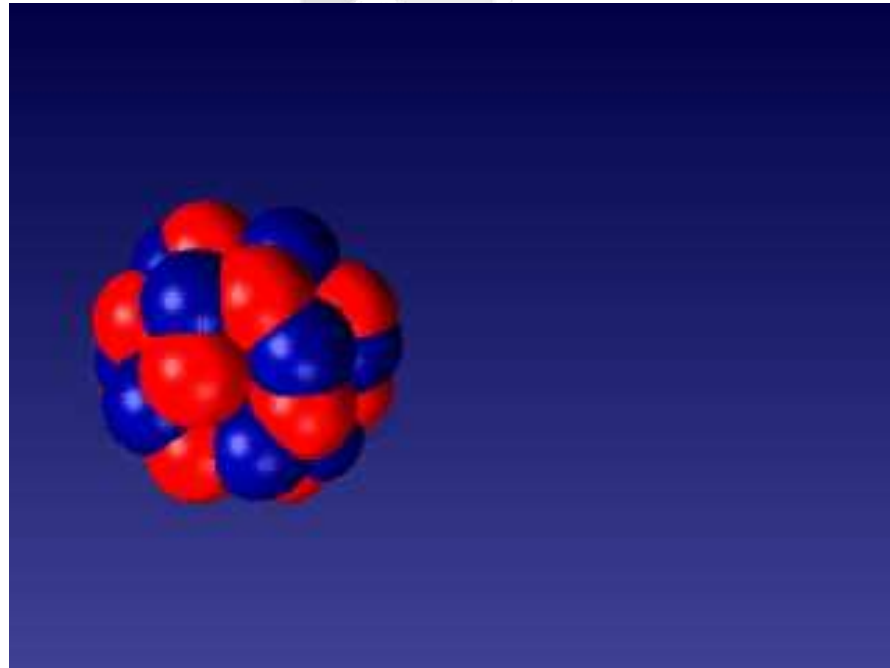
# Beroepsmatige risico's van Radiumtherapie





# H2B: RADIOACTIVITEIT

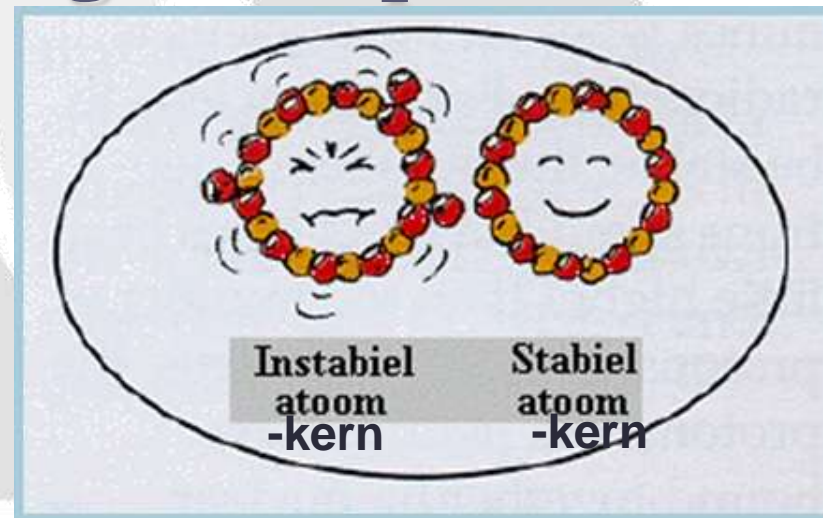
= natuurlijk verschijnsel waarbij **onstabiele atoomkernen** een beter evenwicht bereiken door **ioniserende straling uit te zenden**





# RADIOACTIVITEIT

- *sterke kernkracht*: houdt kerndeeltjes samen
- *afstotende kracht*: tussen de protonen
- beide krachten in evenwicht bij een bepaalde verhouding van # protonen en # neutronen



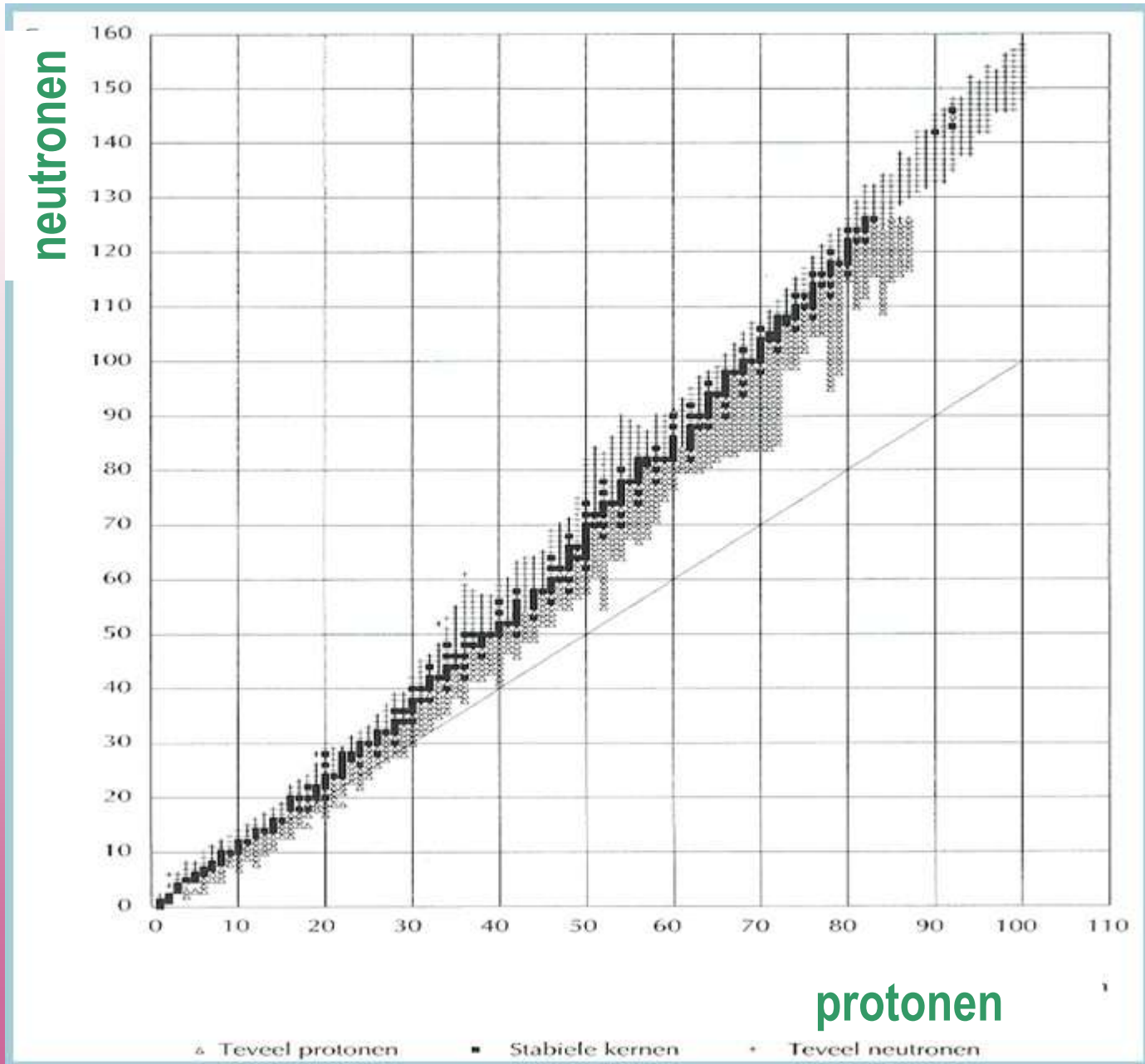


# ISOTOPEN

*gelijk # protonen*  $\Rightarrow$  zelfde atoomsoort  
*verschillend # neutronen* in de kern

vb:	$^{208}\text{Po}$	84 protonen en 124 neutronen
	$^{209}\text{Po}$	84 protonen en 125 neutronen
	$^{210}\text{Po}$	84 protonen en 126 neutronen

# ISOTOPENTABEL





# $\alpha$ -straling

- twee protonen en twee neutronen

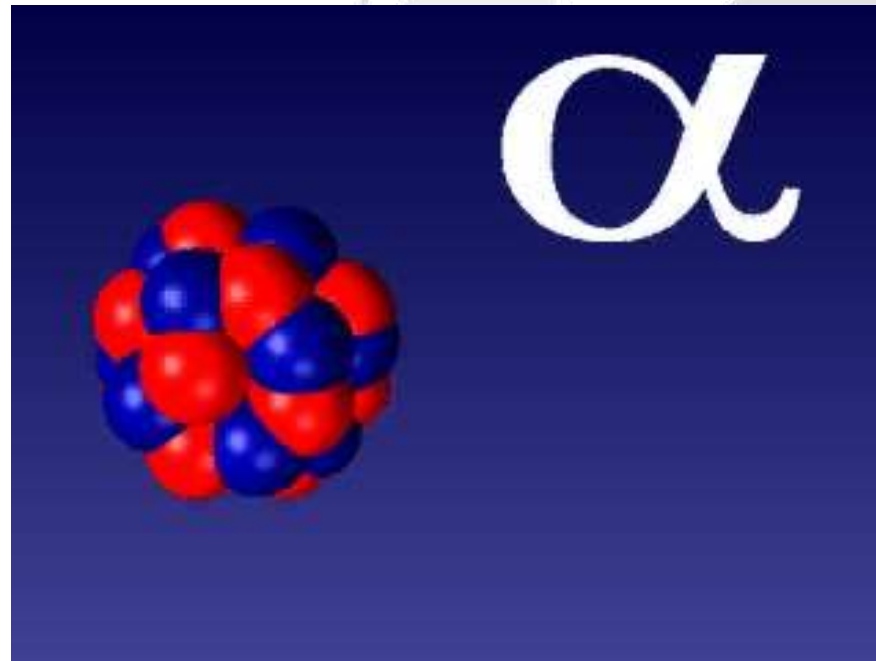
= Heliumkern  ${}^4_2\text{He}^{2+}$





# $\alpha$ -straling

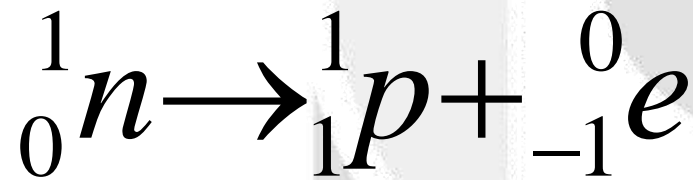
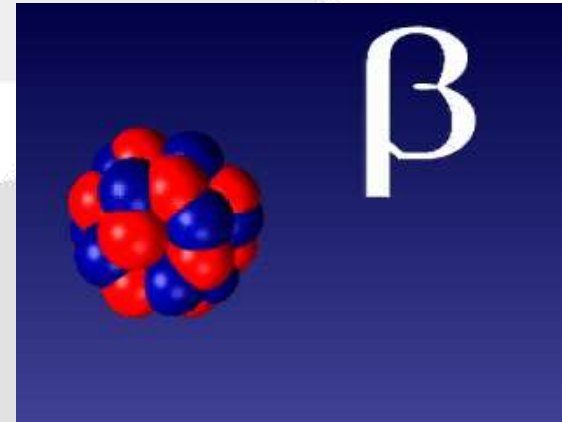
- relatief zwaar deeltje ( $\approx 4$  amu)
- gering doordringvermogen
- eenvoudig tegen te houden





# $\beta^-$ -straling

- kernen met teveel **neutronen** zetten deze om in een **proton** en zenden een **elektron** (=  $\beta^-$ -straling) uit
- groter doordringvermogen dan alfa's, gezien de massa (1/2000 amu)

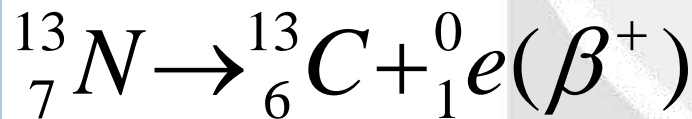
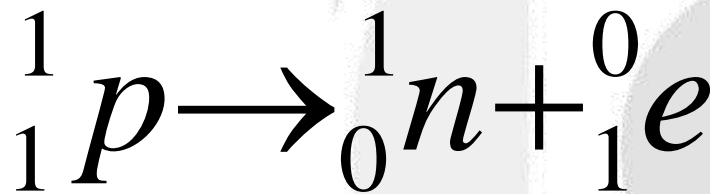






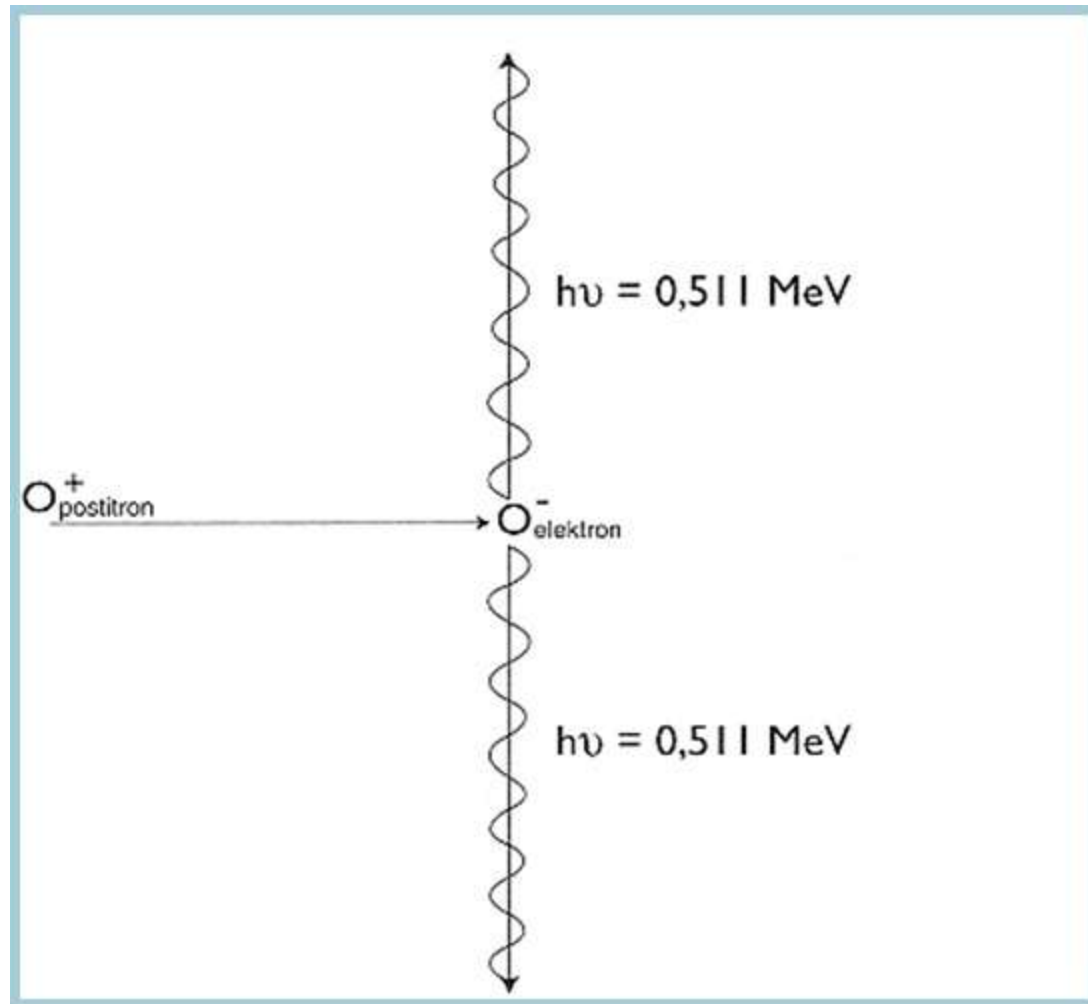
# $\beta^+$ -straling

- kernen met teveel **protonen** zetten deze om in een neutron en zenden een **positron** ( $=\beta^+$ -straling) uit
- annihilatie, basis voor PET

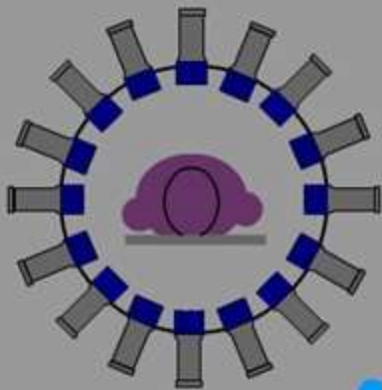
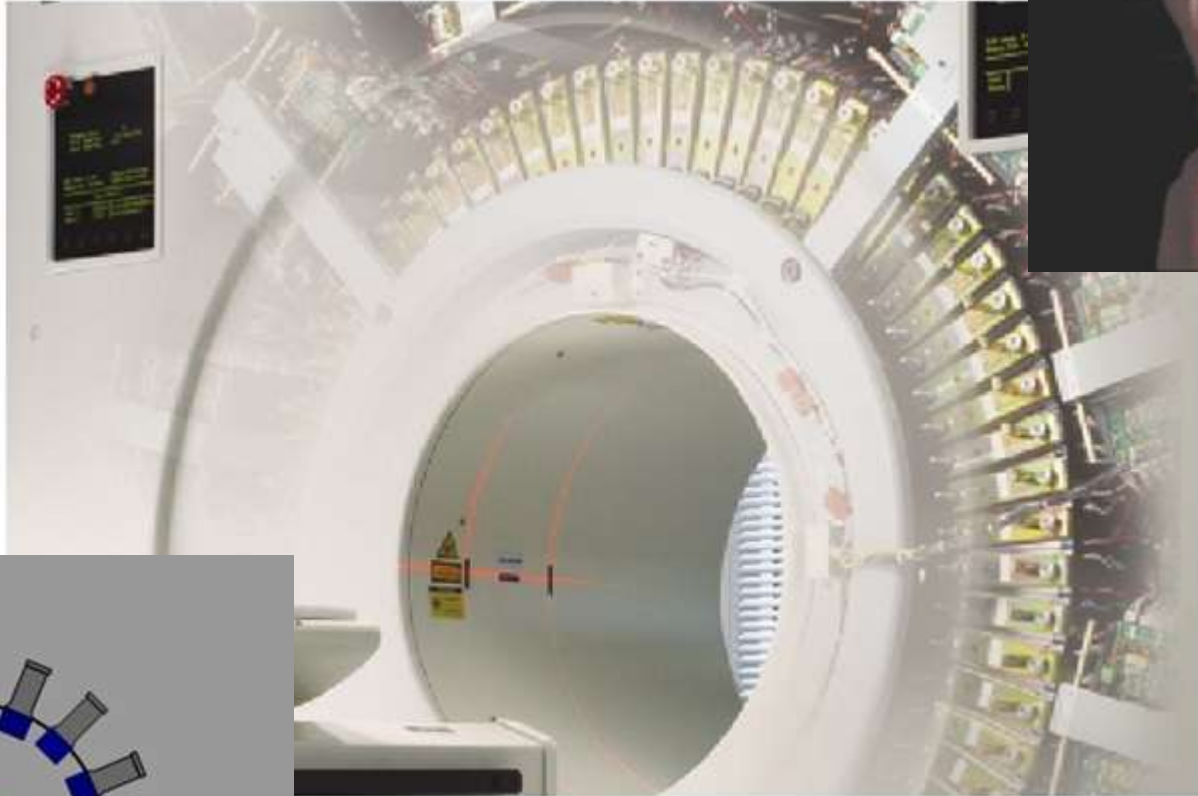




# ANNIHILATIE



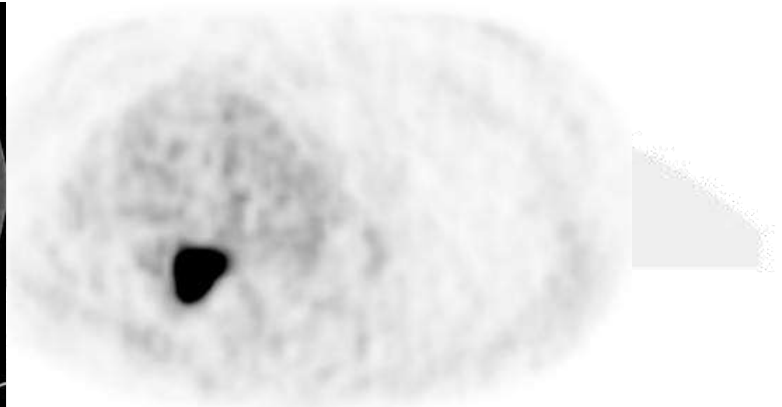
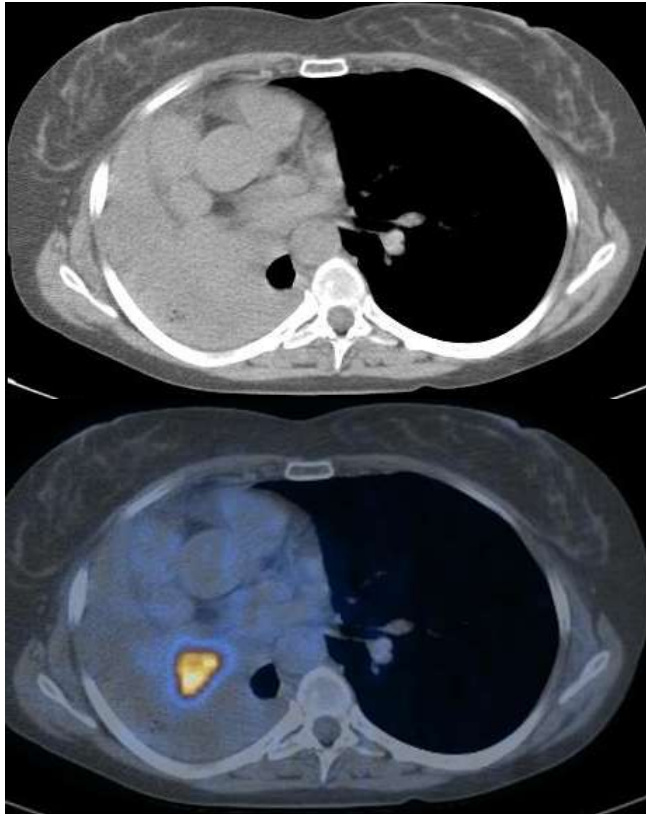
# Positron Emission Tomografie





# CT-PET Voorbeelden

## TUMOR ??



NSCLC met atelectase



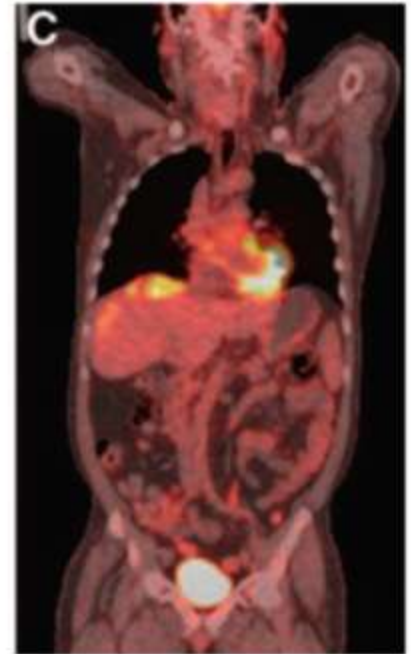
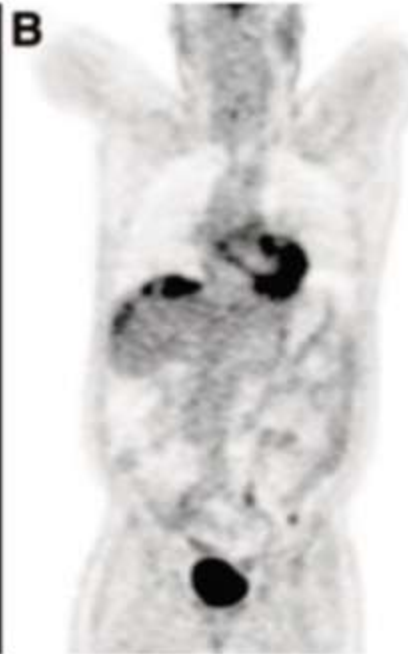
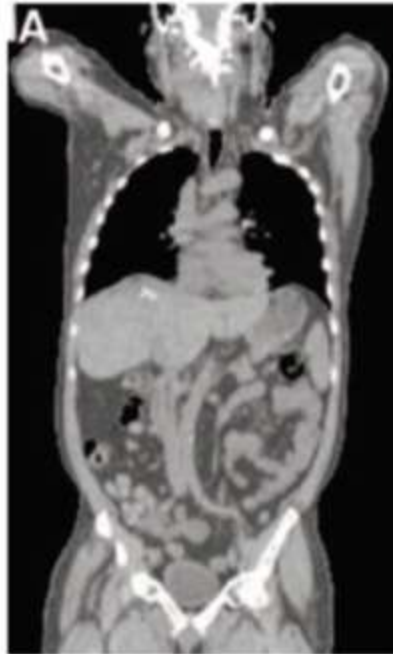
# CT-PET Voorbeelden



Wb CT  
(+ [contrast])

Wb PET

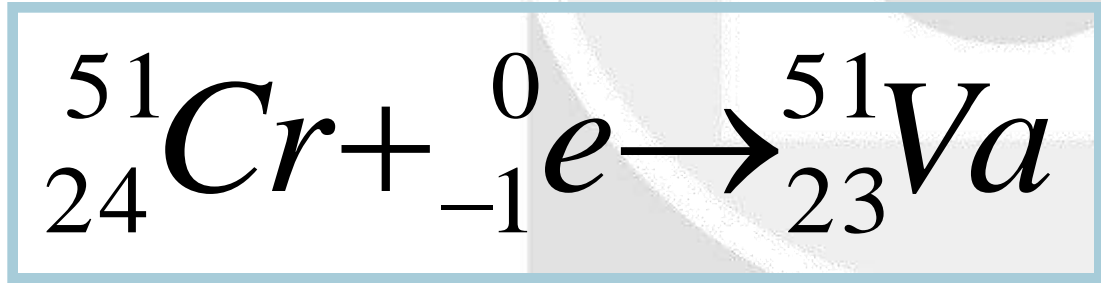
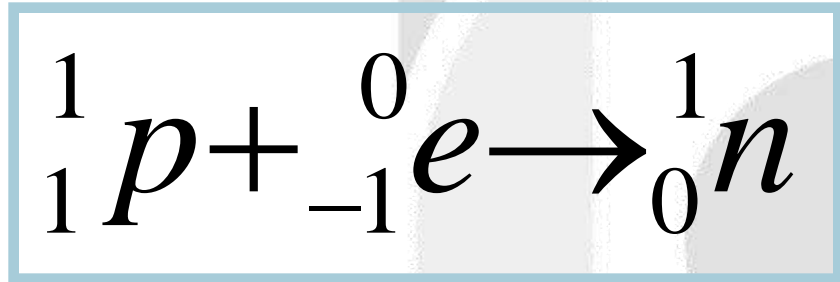
(CT for  
Attenuation  
correction)





# Elektronvangst

- kern met teveel *protonen* vangt een elektron





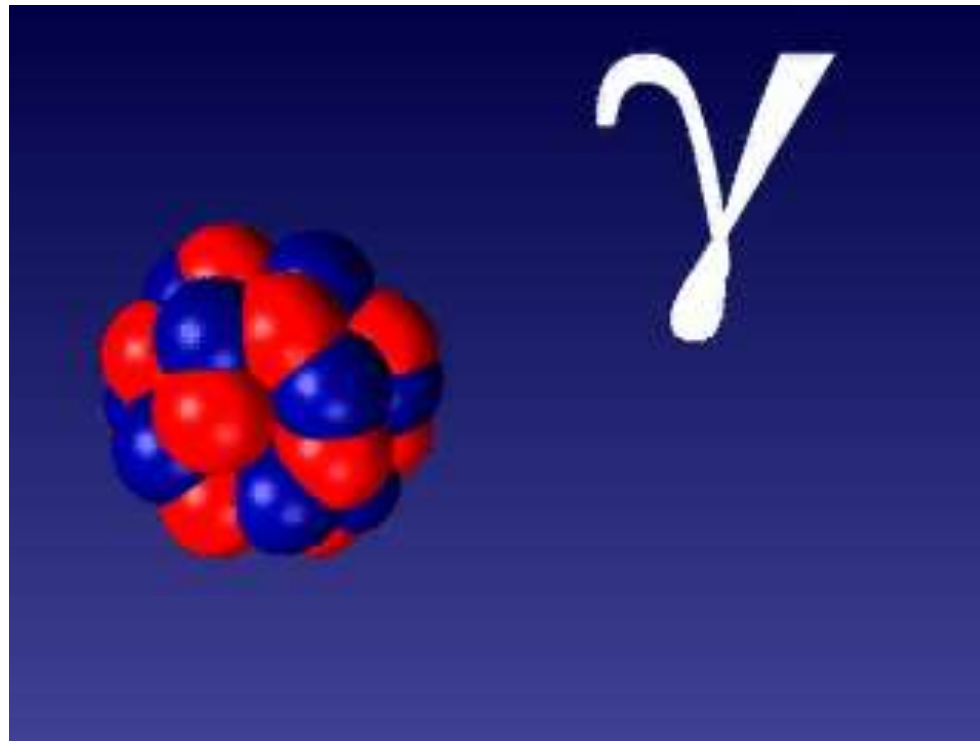
# $\gamma$ -straling

- na verval via alfa- of bètastraling blijft de atoomkern achter in een aangeslagen toestand, het teveel aan energie wordt uitgezonden via **gammastraling**
- groot energiegebied (100 keV - 25 MeV)
- groot doordringvermogen (geen massa)



# $\gamma$ -straling

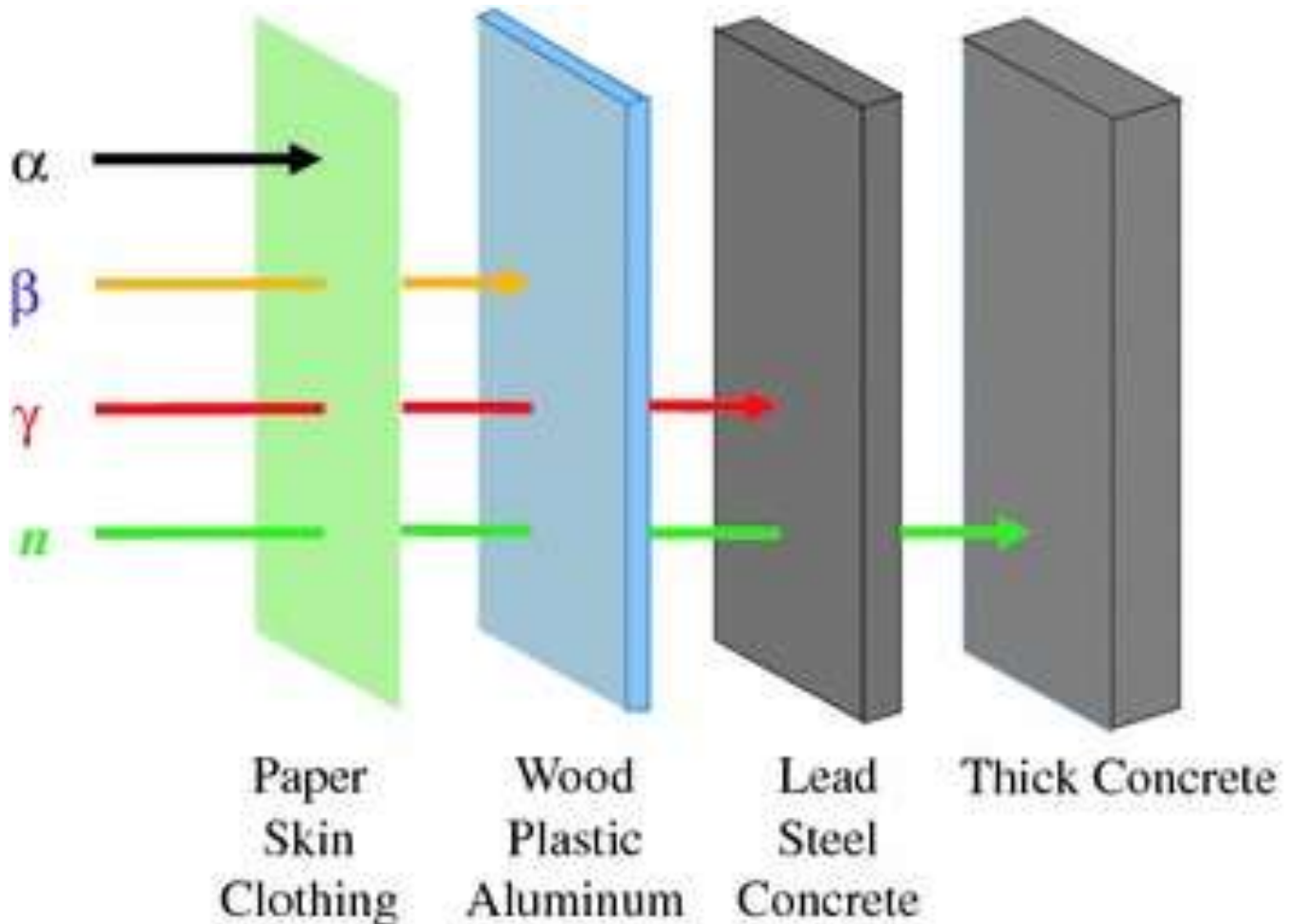
---







# afscherming stralingssoorten





# RADIOACTIEF VERVAL

- = instabiele atomen vervallen naar stabiele atomen door uitzenden van ioniserende straling
- toevallig en spontaan proces - *statistisch*
  - verval in een bepaalde tijdspanne is altijd hetzelfde  
⇒ *exponentieel verval*
  - snelheid van verval wordt beschreven op twee manieren  
vervalconstante ( $\lambda$ ) of **halveringstijd ( $T_{1/2}$ )**



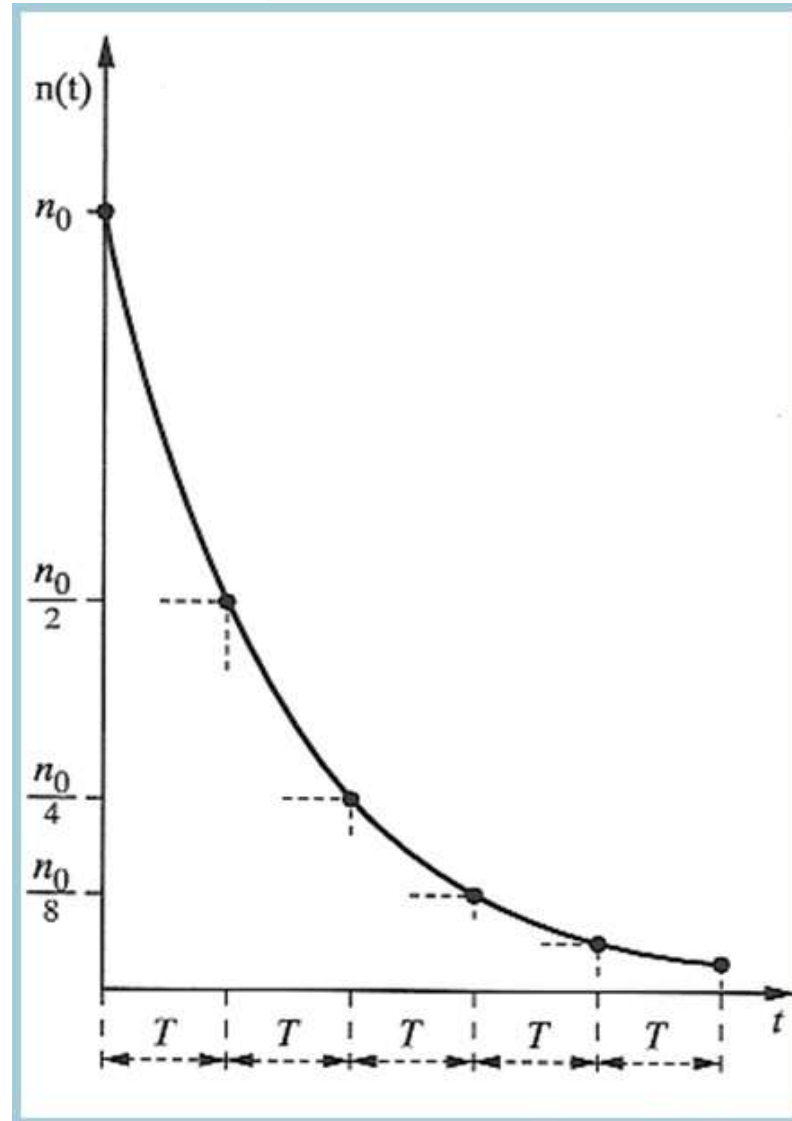
# RADIOACTIEF VERVAL

$$N_t = N_0 * e^{-\lambda t}$$

$$N_t = N_0 * 2^{-t/T_{1/2}}$$



# RADIOACTIEF VERVAL





# HALVERINGSTIJD

<b>Radionuclide</b>	<b>Fysische Halveringstijd</b>
U-238 (uranium)	4.5 $10^9$ jaar
Cs-137 (cesium)	30 jaar
Po-210 (polonium)	138 dagen
Co-60 (cobalt)	5.3 jaar
I-125 (jodium)	60 dagen
Ir-192 (iridium)	74 dagen

*fysische ↔ biologische halveringstijd*



# ACTIVITEIT

- = het aantal kernen dat per seconde vervalst van een stof
- berekening van activiteit tov kalibratiedatum

$$A_t = A_0 * e^{-\lambda t}$$

$$A_t = A_0 * 2^{-t/T_{1/2}}$$

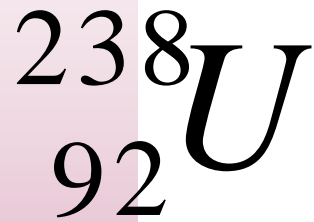


# ACTIVITEIT

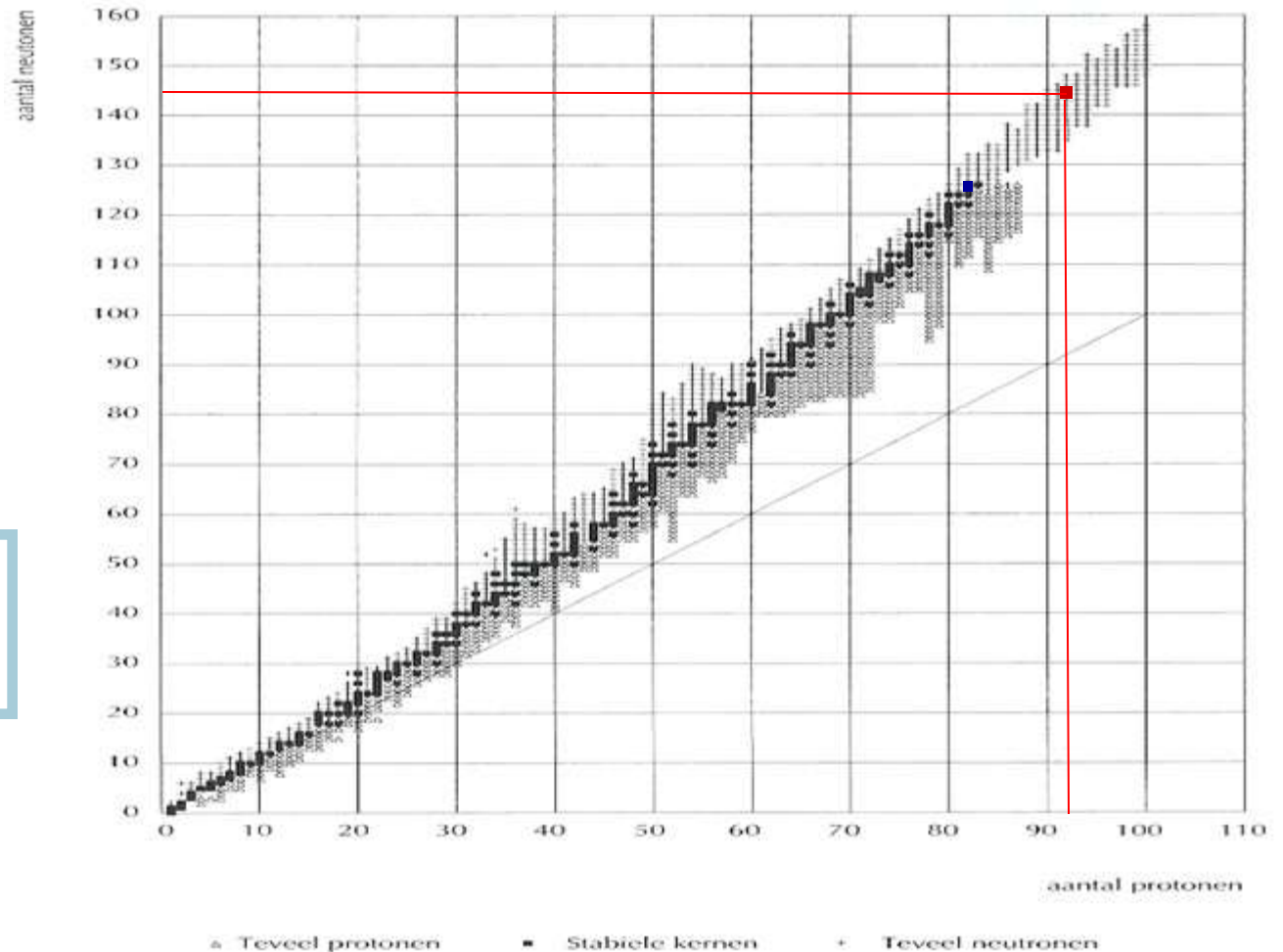




# Vervalreeks U-238



92 protonen  
146 neutronen

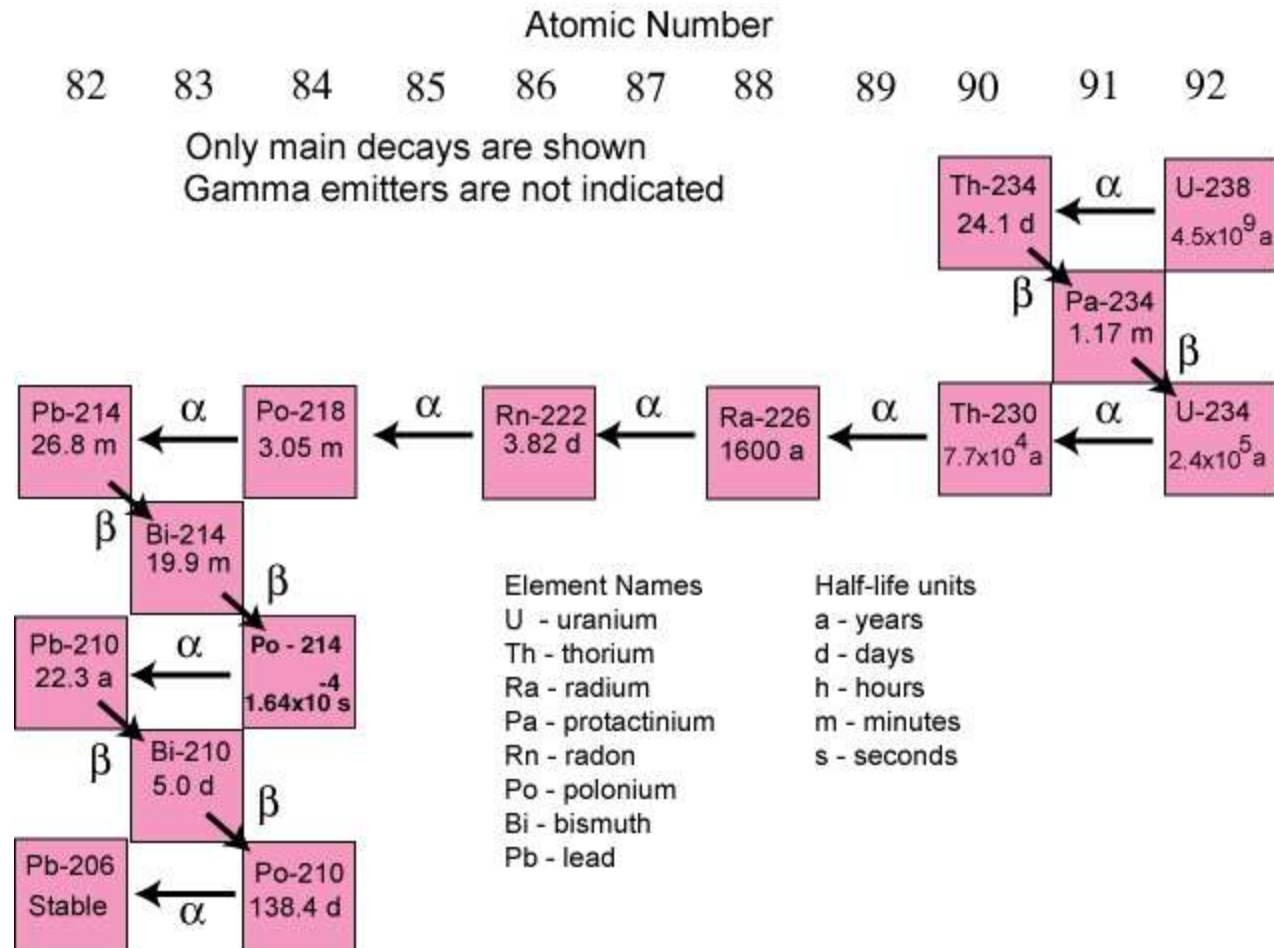






# Vervalreeks U-238

## The Uranium-238 Decay Chain



Leeftijd Aarde: 4,6 miljard jaar